



Sept  
2019

---

# PANNEAU SANDWICH OMEGA BIO-SOURCE POUR L'AERONAUTIQUE

---

Projet BOPA (BIP)

---

Synthèse publique



En partenariat avec :



## REMERCIEMENTS

Alice Gueudet, ADEME, Direction Energies et Productions Durables,  
Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie (SFAB)

## CITATION DE CE RAPPORT

### Auteurs :

Aline Rogeon – Ingénieur R&D, VESO concept  
David Hardy – CEO et CTO, VESO concept

### Contributeurs :

Mathieu Boutin – Doctorant, VESO concept/ICA/LCA-INPT  
Antoine Rouilly – Maître de conférences-HDR, LCA-INPT  
Frédéric Lachaud – Professeur des Universités, ICA et ISAE-SUPAERO  
Maëlen Aufray – Maître de conférences, CIRIMAT  
Alejandra Gomez Campos - Doctorante, LCA-INPT  
Claire Vialle – Maître de conférences, LCA-INPT  
Caroline Sablayrolles – Maître de conférences-HDR, LCA-INPT  
Robert Piquet – Maîtres de conférences-HDR, IUT GMP de Toulouse  
Matteo Riganti – Etudiant, Ecole Polytechnique de Milan

Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque)

#

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

#

Ce document est diffusé par l'ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 1501C0050

### Coordination technique - ADEME :

Alice Gueudet, ADEME,  
Direction Energies et Productions Durables,  
Service Forêt, Alimentation et Bioéconomie (SFAB)



## TABLE DES MATIERES

Résumé .....	4
1. Introduction.....	5
1.1. Contexte du projet .....	5
1.2. Objectifs du projet.....	5
2. Méthodologie.....	6
3. Principaux résultats obtenus .....	6
3.1. Spécifications du produit .....	6
3.2. Matières premières.....	7
3.2.1. Renforts en fibres de lin .....	7
3.2.2. Matrices thermodurcissables .....	8
3.3. Développement d'une plaque stratifié composite.....	9
3.3.1. Adhésion fibres/matrice .....	9
3.3.2. Imprégnation et mise en œuvre de plaques stratifiées.....	9
3.4. Développement d'un panneau oméga aéronautique .....	10
3.4.1. Dimensionnement et modélisation du panneau oméga .....	10
3.4.1. Optimisation du procédé de fabrication de panneaux .....	12
3.4.2. Tests mécaniques et tenue au feu des panneaux.....	13
4. Analyse du cycle de vie (ACV).....	14
4.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude .....	14
4.2. Analyse de l'inventaire.....	15
4.2.1. Matières premières .....	15
4.2.2. Production des panneaux .....	15
4.2.3. Utilisation.....	15
4.2.4. Fin de vie.....	16
4.3. Evaluation de l'impact.....	16
4.4. Résultats et interprétation.....	16
4.4.1. Approche du « berceau au tombeau » (« cradle to grave ») .....	16
4.4.2. Approche du « berceau à la porte » (« cradle to gate ») .....	16
5. Conclusions / Perspectives .....	17
Références bibliographiques.....	18
Index des tableaux et figures et photos .....	19
Sigles et acronymes .....	20

## Résumé

Aujourd'hui, dans les secteurs aéronautique, automobile, les aménagements intérieurs sont principalement réalisés en fibres de verre, de carbone, d'aramide ou en alliage d'aluminium. Ces matériaux possèdent de bonnes propriétés mécaniques mais leurs procédés de fabrication nécessitent une consommation élevée d'énergie. De plus les réglementations et notamment la loi POPE (Programme d'Orientation de la Politique Énergétique française)<sup>1</sup> visent à réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Dans l'optique de réduire cette consommation d'énergie mais aussi les niveaux d'émissions de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub>, ces industries se tournent vers des alternatives aux énergies fossiles et vers des matériaux composites. Sont également recherchés des matériaux composites plus légers que ceux existants, ce que peuvent offrir les matériaux composites à base de fibres naturelles.

C'est dans ce contexte que l'entreprise VESO-Concept, un bureau d'étude menant une activité de R&T depuis 7 ans sur les matériaux éocomposites, s'est rapproché du Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (LCA) (UMR 1010 INRA/INPT-ENSIACET), du CIRIMAT (UMR 5085) et de l'ISAE-SUPAERO/Institut Clément ADER (ICA) afin de développer un panneau sandwich composite biosourcé à base de fibres de lin avec une architecture innovante, et ce pour l'industrie aéronautique. Le but est d'obtenir un produit plus léger en ayant un coût inférieur et qui réponde au cahier des charges du secteur aéronautique (tenue mécanique, comportement à l'impact, produit auto-extinguible, tenue au feu etc.). Les travaux menés ont permis d'identifier, de tester et de retenir un renfort en lin et une résine pour la réalisation des panneaux. Une étude a également été réalisée sur l'amélioration de l'adhérence entre le renfort et la matrice. Elle a permis de montrer qu'une amélioration était possible de façon simple et sans recourir à des traitements chimiques (type greffage) ou physiques (corona, plasma). Un procédé de mise en œuvre de panneau a été mis au point et optimisé. Les tests mécaniques indiquent que ces panneaux sont au moins aussi performants que ceux utilisés actuellement dans l'aéronautique. Les travaux de simulation numérique ont permis d'obtenir une bonne corrélation entre les modèles et les propriétés du panneau oméga. L'analyse ACV du panneau en lin indique que la phase d'usage est prépondérante sur celle de la fabrication.

## ABSTRACT

Nowadays, in aeronautic and automobile areas, interior designs are mainly made with glass, aramid, carbon fibre or aluminium alloys. These materials exhibit good mechanical properties but their manufacturing processes require high amount of energy. Moreover regulations and particularly POPE legislation (Orientation Program of French Energy Policy)<sup>1</sup> aim to drastically reduce greenhouse gas emissions by 2050. To reduce energy consumption and CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions, these industries look for alternatives to fossil fuels and to composite materials. They are also seeking for lighter composite materials, properties that can offer natural fibre-based composites.

In this context, VESO concept, a mechanical engineering company developing since 2009 eco-composite materials, the Laboratory of Agro-Industrial Chemistry (LCA, UMR 1010 INRA/INPT-ENSIACET), the Inter-University Centre for Research and Engineering of Materials (CIRIMAT, UMR 5085) and ISAE-SUPAERO/Clément Ader Institute (ICA) have worked together to develop a flax fibre-based composite sandwich panel with an innovative architecture for aeronautic industry. The objectives were to get a product lighter, cheaper and that meet aeronautical requirements (mechanical properties, impact behaviour, fire behaviour etc.). We were able to identify, test and choose a flax reinforcement and a matrix for manufacturing the panels. A study was conducted to improve adhesion between fibres and resin. An enhancement was possible without chemical (grafting) or physical treatment (corona, plasma). A process to manufacture omega panel was done and optimized. Mechanical tests were performed showing that these panels are at least as performant as those currently used in aircrafts. Simulation works have enabled to obtain a good correlation between models and properties of omega panels. LCA was performed indicating the use phase was predominant over manufacturing phase.

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte du projet

Le secteur de la mobilité joue un rôle important dans la consommation d'énergie et dans les émissions de gaz à effet de serre (GES). Parmi les secteurs de la mobilité, l'aéronautique est un secteur en croissance constante notamment grâce aux offres low cost. Ainsi, dans le secteur de l'aviation, de nombreuses réglementations tendent à imposer une réduction des GES. Au niveau européen, the Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE) a présenté les objectifs à atteindre en 2050 sur le plan environnemental dans son rapport 'Flightpath 2050'<sup>1</sup>. Le but est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 75 %, de NO<sub>x</sub> de 90 % et le bruit de 65 %<sup>2</sup>. Afin d'atteindre ces objectifs, les industriels se tournent vers des matériaux composites. Il est ainsi attendu qu'à l'horizon 2020, les avions conçus par Airbus notamment seront constitués en matériau composite à hauteur de 50 %<sup>3</sup>. Les matériaux composites à base de fibres naturelles sont donc une option intéressante puisque la densité des fibres naturelles est inférieure à celle de la fibre de verre. C'est la raison pour laquelle nous proposons ce projet de réalisation d'un panneau composite biosourcé à architecture innovante pour l'aéronautique.

En effet, des matériaux plus légers conduiront à une plus faible consommation de kérosène et à moins d'émissions de GES. Par exemple, dans un avion, un gain d'une tonne conduit à une économie de 3 millions EUR de carburant sur la durée de vie de l'avion. De plus, il est attendu des fibres naturelles qu'elles présentent un impact plus faible comparées aux fibres minérales. La substitution des fibres minérales par des fibres naturelles issues d'une plante à fort rendement et faible taux d'intrants apparaît comme le principal enjeu environnemental du projet.

Par ailleurs, ce marché des composites biosourcés est porteur et en croissance. Selon une étude<sup>4</sup>, il est attendu que le marché des composites à base de fibres naturelles atteigne 6,5 milliards de dollars en 2021 (soit 5,9 milliards EUR) avec un taux de croissance annuel moyen de 11,68 % entre 2016 et 2021. C'est dire tout le potentiel qu'ont les matériaux composites biosourcés dans le secteur aéronautique et la pertinence de ce projet.

Un autre défi mondial est le prix des matières premières. À cause de tensions géopolitiques, des experts prédisent la volatilité des prix des minerais (parmi lesquels le fer et l'aluminium). Les fibres de carbone sont faites à partir de polyacrylonitrile (PAN), un composant dont le prix dépend de celui du pétrole. En utilisant des fibres naturelles pour la fabrication des composites dont le prix ne dépend pas du pétrole, nous réduisons le risque d'inflation des prix.

Pour la société VESO CONCEPT, les enjeux socio-économiques sont importants puisqu'il s'agira de produire en série les panneaux composites en fibres végétales qui seront issus de ce projet.

### 1.2. Objectifs du projet

L'objectif global de ce projet est de produire un panneau structurel sandwich innovant, qui, de par son architecture et sa composition, aura un poids 25% inférieur à ce qui existe. Le domaine d'application est l'aéronautique où ce panneau pourra ainsi servir en tant que plancher ou comme cloison murale et ainsi remplacer les panneaux de type GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy) ainsi que d'autres types de panneaux comme ceux en fibres de verre. Ce gain de poids permettra ainsi de réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub>) de l'avion. Ainsi sur un avion comportant 4 tonnes de panneaux sandwichs, un gain de 25% en poids conduirait à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 120 tonnes sur la durée de vie de l'avion. Le panneau développé sera biosourcé avec des fibres de lin et une matrice à base de résine époxyde de préférence biosourcée. Il permettra ainsi de remplacer des ressources fossiles comme la fibre de verre. Le développement du composite se fera selon une démarche d'éco-conception

Enfin il répondra au cahier des charges de l'industriel tant sur les aspects de procédés, propriétés du composite final tout en ayant un coût inférieur de 15%.

Pour cela, nous voulons :

- substituer les matières utilisées pour les panneaux type GLARE et issues de ressources fossiles (fibre de verre, d'aramide, aluminium) par des fibres de ressources renouvelables comme le lin choisi pour ce projet
- identifier la matrice (résine +durcisseur) therm durcissable (biosourcée si possible) la plus adaptée avec le renfort à base de lin
- optimiser l'adhérence entre le renfort et la matrice de façon à limiter le recours à des prétraitements des fibres; si des prétraitements doivent être mis au point, ceux-ci devront être respectueux de l'environnement
- optimiser le procédé d'assemblage du panneau sandwich afin qu'il soit facilement transposable à l'échelle industrielle et qu'il permette une réduction de la toxicité de mise en œuvre pour l'opérateur (en limitant les COV notamment).
- obtenir une pièce finie plus légère de 25% par rapport à l'existant
- avoir une meilleure isolation acoustique et thermique grâce aux propriétés intrinsèques du lin
- avoir un produit plus respectueux de l'environnement.
- avoir un produit final qui répond au cahier des charges du secteur aéronautique (tenue mécanique, comportement à l'impact, produit auto-extinguible, tenue au feu, poids...)

Le présent projet vise à atteindre ces objectifs à travers d'une action de recherche industrielle et de développement expérimental (formulation et preuve de concept, amélioration de la performance des matériaux produits, réalisation de panneaux prototypes) sur une échelle TRL allant de 4 à 7. Il s'inscrit dans le cadre de l'appel à intention BIP 2015 : « Bioraffineries : produits biosourcés pour la chimie et les matériaux » et est co-financé par l'ADEME.

## 2. Méthodologie

Afin de réaliser les travaux précités, plusieurs lots de travail ont été définis en plus d'un lot de management:

- Le premier lot concerne les spécifications du panneau pour dimensionner correctement l'objet, identifier les normes auxquelles il doit répondre et valider la liste d'essais qui sera à réaliser sur le composite final
- Un deuxième lot de travail porte sur l'identification, l'analyse et la validation de renforts et matrices qui serviront au développement du panneau oméga
- un troisième lot a pour but l'optimisation de l'adhésion entre les fibres et la résine, le développement d'un protocole et d'une méthode fiable de mise en œuvre de composites stratifiés et la caractérisation desdits composites.
- un quatrième lot vise au développement d'un panneau sandwich répondant aux critères des avionneurs. Ce lot permettra de dimensionner correctement le panneau pour permettre sa conception. Sa mise en œuvre devra être optimisée afin de pouvoir industrialiser ce type de panneaux.
- le cinquième lot a pour objectif la fabrication d'un démonstrateur
- le sixième lot est l'Analyse de Cycle de vie (ACV) qui permet d'évaluer l'impact environnemental d'un tel panneau et de comparer cet impact à celui d'un panneau en fibres de verre. Cette analyse a également pour objectif d'optimiser et d'améliorer le procédé dans le cadre d'une démarche d'éco-conception.

## 3. Principaux résultats obtenus

### 3.1. Spécifications du produit

Préalablement aux études liées à toutes les étapes du développement du panneau oméga en lin, un cahier des charges produit a été formalisé.

Des spécifications au niveau renfort, matrice et au niveau composite (panneau) ont été définies selon plusieurs critères :

- Environnemental (développement durable...);



- Santé ;
- Sécurité ;
- Performances techniques ;
- Coûts.

Pour le critère environnemental, les spécifications portaient principalement sur l'impact environnemental des produits, leur caractère biosourcé ou recyclable ou réutilisable ainsi que sur le stockage des matières premières (long et à température ambiante).

Dans le domaine de la santé et de la sécurité, les produits utilisés ou finals ne devaient pas poser de problème pour l'utilisateur durant son usage et sa manipulation (COV, produits conformes selon la réglementation REACH...).

Le coût produit doit être inférieur à celui du produit de référence avec pour stratégie une nouvelle architecture produit, moins d'ingrédients matières et de pré-traitements. L'ensemble de ces combinaisons avec un coût matière maîtrisé doit nous permettre de faire une économie de 15%.

Les spécifications de performances techniques concernent :

- Les performances mécaniques que le produit doit tenir (flexion 3 points...)
- La tenue au vieillissement, aux UV, à l'humidité et aux champignons
- La compatibilité avec des fluides (boissons, huiles, produits de nettoyage...)
- La tenue au feu

Afin de permettre de confronter notre produit à ce cahier des charges, une liste d'essais et de normes à suivre pour la réalisation de ces essais a été établie parmi lesquelles nous pouvons citer la norme FAR 25.853 ou l'ASTM C393.

## **3.2. Matières premières**

Les panneaux oméga, que nous souhaitons substituer à ceux en fibres synthétiques seront à base de fibre de lin et de résine thermodurcissable.

### **3.2.1. Renforts en fibres de lin**

Plusieurs fournisseurs de fibres de lin ont été approchés pour cette étude, essentiellement français ou de pays limitrophes.

Une première sélection s'est effectuée sur la base des données des fabricants afin de ne tester que les tissus les plus pertinents pour le projet. Les premiers critères de sélections étaient la disponibilité, la masse et la qualité du renfort puisque les propriétés mécaniques des tissus et d'autres caractéristiques comme le taux de reprise en humidité ne sont pas indiqués par les fabricants.

Deux tissus convenaient à ces exigences et ont été testés.

La comparaison des deux tissus portait sur :

- Les caractéristiques du tissu (trame, grammage, largeur de mèche, épaisseur...)
- Test de traction des mèches
- Détermination de l'ajourage du tissu par microscopie (Photo 1) et traitement des images prises
- Détermination du taux d'humidité par balance infrarouge

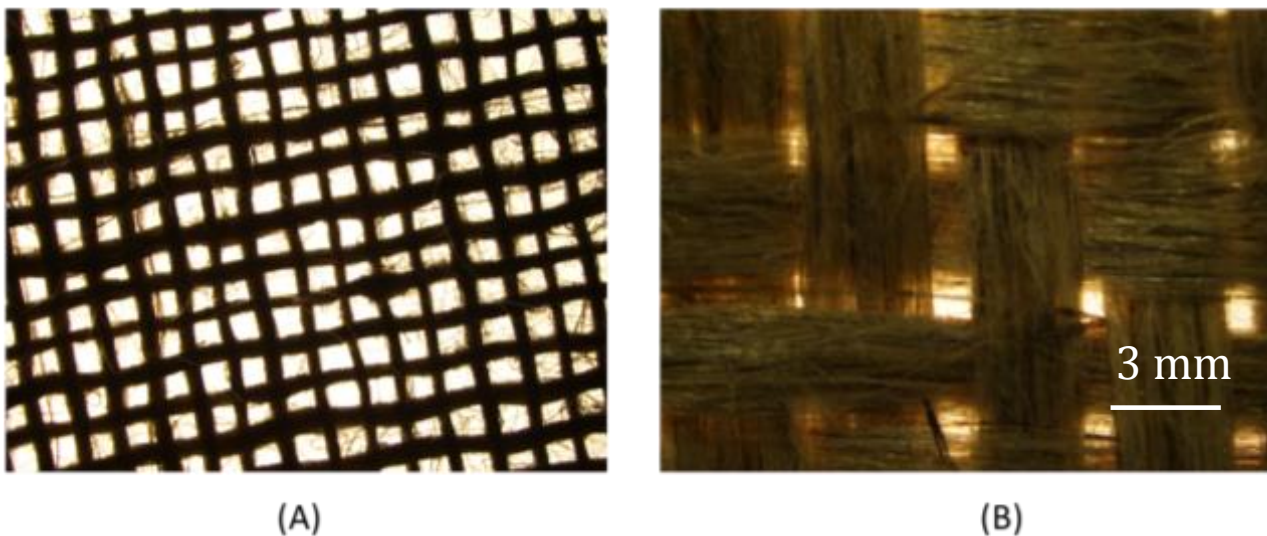


Photo 1. Observation de tissus à la loupe binoculaire

A partir des données recueillies et analysées, un tissu en lin a été choisi pour le reste du projet.

### 3.2.2. Matrices thermodurcissables

Pour des applications structurales, les matrices des matériaux composites sont généralement thermodurcissables. Les thermodurcissables, comme les époxydes par exemple, ont de nombreux atouts comme des propriétés mécaniques en adéquation avec les cahiers des charges aéronautiques mais sont aussi avantageux à mettre en œuvre. Depuis quelques années, les industriels commencent à proposer également des résines bio-sourcées, c'est-à-dire une partie du carbone provient de la biomasse mais qui ne sont pas recyclables actuellement, et depuis peu des résines réutilisables. Face à cette variété, un travail de sourcing et de sélection est nécessaire.

Une première sélection a été faite et 5 résines ont été retenues.

Afin de choisir celle qui servira pour la réalisation des panneaux oméga du projet BOPA, une comparaison des propriétés de ces résines a été faite sur les critères suivants :

- Températures de transition vitreuse mesurées en DSC et DMA après un cycle de cuisson identique pour chacune d'entre elles
- Viscosité du mélange pré-polymère/durcisseur
- « Pot life » ou temps de travail avant la gélification et prise en masse
- Tenue au feu
- Teneur en biosourcée
- Recyclabilité
- Coût

A partir de l'analyse de ces critères une seule matrice est conservée pour le projet.



### 3.3. Développement d'une plaque stratifié composite

Dans ce lot de travail, l'objectif était de trouver une méthode améliorée pour la réalisation du biocomposite aéronautique à partir du renfort et de la matrice choisis précédemment

Les deux axes identifiés pour arriver au résultat sont :

- l'adhésion fibres/matrice
- la méthode d'imprégnation des renforts

#### 3.3.1. Adhésion fibres/matrice

Pour améliorer l'adhésion entre les fibres et la matrice, un système modèle (résine DGEBA (Di-Glycidyl Ether of Bisphenol A) et durcisseur DETA (Diethylenetriamine)) dont la chimie est bien connue a été utilisé pour simplifier la compréhension des phénomènes par rapport à la résine commerciale qui est formulée de manière complexe. Les méthodes mises au point ont par la suite été extrapolées au système commercial final.

Cette étude est la partie la plus théorique réalisée dans le projet. Elle a été divisée en deux parties :

- Une étude de l'influence des fibres naturelles sur la réaction de polymérisation : un système expérimental a été mis au point pour permettre d'étudier les conséquences de l'immersion du tissu de fibres sur la réactivité de chacun des composants de la matrice pris séparément. Cette étude a ensuite permis de comprendre les modifications structurales engendrées par l'ajout de fibres à travers l'analyse systématique des propriétés thermomécaniques de la matrice poly-époxy seule. Les effets sont d'ailleurs assez marqués et différents pour l'époxyde et pour l'amine. Cette étude a fait l'objet d'une publication.
- Les résultats de cette première étude ont ensuite été utilisés pour étudier l'influence de la stœchiométrie de la matrice modèle sur les propriétés du composite cette fois (mécaniques et thermiques). Ces propriétés ont pu être améliorées jusqu'à 67% pour la contrainte en flexion et 13% pour le module de flexion dans les conditions de l'expérimentation. Ainsi, en maîtrisant bien la quantité de chacun des réactifs, nous avons développé une méthodologie d'amélioration fibre/matrice plus directe (sans pré-traitement des fibres avec un composé tiers) et plus favorable du point de vue de l'impact environnemental du procédé.

L'extrapolation des résultats obtenus sur la matrice simplifiée à la matrice commerciale a également été faite, c'est à dire que les mêmes expérimentations ont été faites sur la résine commerciale. Les tendances sont légèrement différentes et sont dues à la présence d'adjuvants dans la matrice commerciale que n'a pas la matrice modèle. Une étude complémentaire a été menée à partir du système modèle auquel a été ajoutée un des adjuvants présent dans la résine commerciale. Les résultats obtenus sont similaires à ceux de la résine commerciale choisie. Dans ce cas-là, les gains sur les propriétés mécaniques sont plus modestes, à cause de la complexité du mélange et du taux de charges important. Pour aller plus loin dans la compréhension du système matrice polyepoxy/fibres de lin, des analyses en chromatographie gazeuse inverse ont été également entreprises afin de déterminer les énergies de surface de la matrice (modèle avec deux rapports durcisseur/époxydes et commerciale) et des renforts fibreux.

#### 3.3.2. Imprégnation et mise en œuvre de plaques stratifiées

L'étape suivante dans le développement de plaques composites stratifiée est l'étude de différents paramètres d'imprégnation et de mise en œuvre du composite sur ces propriétés mécaniques et sa porosité que sont :

- Les conditions de séchage du tissu (temps, température...)
- La pression de mise en œuvre
- La température de réticulation
- Temps de mise en œuvre

Après leur mise œuvre, les plaques stratifiées ont été testées prioritairement en DMA et en flexion 3 points pour quantifier leurs propriétés mécaniques.

La pression est le paramètre qui a le plus d'impact sur les propriétés mécaniques. L'augmentation de cette dernière permet de diminuer la porosité, d'augmenter le taux de fibres et d'améliorer l'imprégnation des fibres. Mais une pression trop élevée peut endommager les fibres et donc diminuer les propriétés mécaniques du composite.

Le séchage des fibres est aussi relativement important pour les propriétés du composite. Diminuer la quantité d'eau dans les fibres permet d'améliorer l'interface fibres/matrice, de limiter l'évaporation durant le procédé et donc de diminuer la porosité et enfin de limiter le vieillissement dû au gonflement cyclique des fibres<sup>5</sup>. Là aussi, un séchage trop important peut altérer la structure des fibres et entraîner une perte de propriétés mécanique.. Cependant ce paramètre reste difficile à maîtriser en raison du caractère très hydrophile des fibres.

Les paramètres de mise en œuvre pour atteindre la contrainte maximale sont conservés pour la suite du projet.

D'autres tests mécaniques en cisaillement interlaminaire et plan, en traction et en cyclage ont été réalisés pour permettre de mieux caractériser le stratifié et d'avoir des données de référence pour la simulation numérique.

Des brevets concernant ces travaux sont actuellement en cours d'instruction.

### 3.4. Développement d'un panneau oméga aéronautique

Les travaux d'optimisation de process de fabrication de panneaux et de modélisation de panneaux oméga en lin ont été faits en parallèle des travaux de modélisation numérique.

#### 3.4.1. Dimensionnement et modélisation du panneau oméga

La méthodologie de modélisation a fait appel à une analyse multi-échelle des matériaux et des panneaux couplée à une comparaison essais-calculs. Pour des besoins de modélisation, des essais complémentaires ont été réalisés, notamment sur le nid d'abeille en aramide.

Que ce soit pour les sollicitations statiques ou dynamiques, les modélisations développées sont de plusieurs types :

- Une approche « coque stratifié » où les peaux et l'âme des panneaux sont modélisées par des plis stratifiés (Figure 1a),
- Une approche dite « Mixte Coque-Volume » où les peaux sont modélisées par des éléments coques stratifiés et l'âme en volume orthotrope (Figure 1b),
- Une approche dite « meso » où les peaux sont modélisées par des éléments coques stratifiés et l'âme par des coques orthotropes où chaque maille du nid d'abeilles est représentée (Figure 1c). Dans le cas du panneau final peau Lin et âme Lin Omega, l'approche coque stratifiés seule sera utilisée.

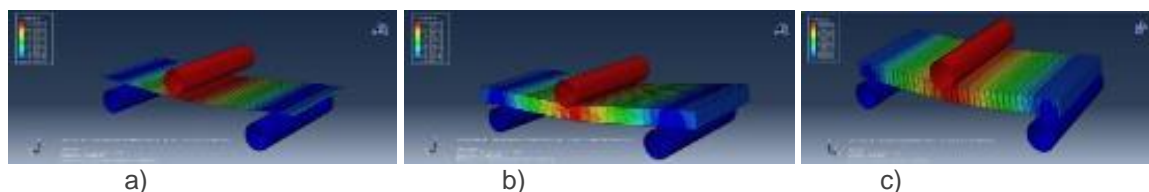


Figure 1. Les différentes approches des modélisations par éléments finis des panneaux Sandwichs à âme NIDA (cas des modèles de flexion 3pts)

L'ensemble de ces modèles est le résultat d'une étude préliminaire de convergence en termes de maillages, méthodes de modélisations (types de contacts, liaisons peaux-NIDA, conditions aux limites, comparaison entre types de modèle etc).

Dans le cadre de la mise au point du modèle numérique par éléments finis des panneaux Omega à fibre de Lin, un outil analytique de prévision des raideurs des panneaux Omega a été réalisé. Il est basé sur le calcul des raideurs de flexion et de cisaillement de poutres composites<sup>6</sup>. L'ensemble des modèles est réalisé sous le code de calculs par éléments

finis ABAQUS. Deux types de sollicitations sont réalisés. Les analyses sous sollicitations statiques non-linéaires utilisent le solveur Standard (Newton-Raphson sous Abaqus Standard). Les analyses sous sollicitations dynamiques explicites non-linéaires pour applications aux crashes/impacts sont réalisées sous Abaqus Explicit (Différences Finies centrées sous Abaqus Explicit).

Le comportement du panneau oméga en lin est comparé à celui d'un panneau sandwich en lin et à celui d'un panneau sandwich en fibre de verre. Le comportement des peaux tissées (Verre-Epoxy et Lin-Epoxy) et des âmes des panneaux sandwich (NOMEX et Lin-Omega) est non linéaire avant rupture essentiellement dû à l'endommagement.

Le modèle de comportement utilisé pour la modélisation de l'endommagement et de la rupture des tissés est basé sur la théorie de la mécanique de l'endommagement utilisant des variables d'endommagement pour décrire les phénomènes de fissuration matricielle inter et intra laminaire et des variables de rupture pour décrire le comportement adoucissant post rupture. Ce modèle introduit aussi un comportement endommageable couplé à un modèle de pseudo plasticité permettant de prendre en compte le calcul des déformations résiduelles lors du déchargement. Ce modèle est utilisable aussi bien en quasi statique pour des analyses non linéaire non dépendant des vitesses de déformation qu'en dynamique rapide pour des approches sous sollicitations de types impacts ou crashes.

La perte de raideur est liée à plusieurs modes de rupture et/ou endommagement selon si le comportement est fragile ou avec endommagement progressif puis fragile. On distingue donc deux comportements différents à l'échelle du pli :

- Comportement fragile (rupture sens chaîne en traction ou compression, cf Figure 2a.),
- Comportement endommageable avec rupture (en cisaillement, cf Figure 2b.).

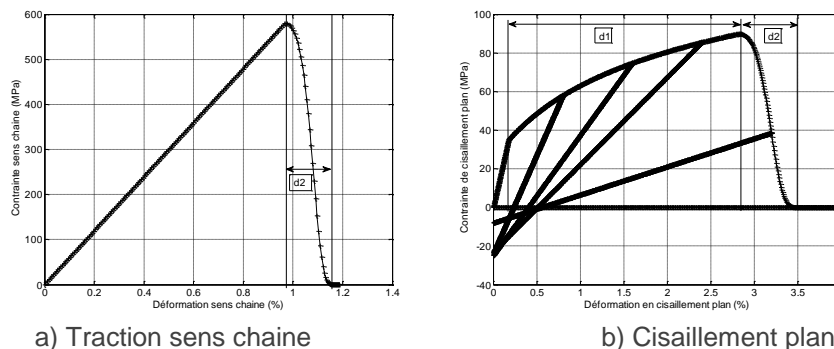


Figure 2 Exemple de comportement contrainte déformation en traction sens chaîne et en cisaillement plan pour un tissu satin de 5 G803/914

Afin de minimiser la localisation des endommagements et rendre moins sensible les modèles éléments finis au raffinement de maillage, un effet de vitesse (effet retard) a été ajouté sur les variables d'endommagement liées à la rupture sens fibres et liées à la rupture matricielle<sup>7,8,9</sup>.

La comparaison des valeurs obtenues par les modèles et des valeurs expérimentales dans le cas d'essais de flexion 3 points a été faite.

Dans le cas des panneaux classiques en fibres de verre, la comparaison des raideurs initiales indique des valeurs très proches que ce soit sur les modèles numériques qu'analytique (inférieur à 10%). Ces données permettent de valider les modèles éléments finis et analytiques.

La modélisation du panneau Omega a été réalisée en coque stratifié. Le maillage a été optimisé pour permettre un temps de calcul peu important tout en ayant une bonne convergence en déplacement. Pour ce faire la raideur du modèle est comparée à celle des essais. Les conditions aux limites sont conformes aux essais (conditions de contacts entre les rouleaux rigides et le panneau).

La comparaison essais-calculs est donnée en termes de comportement globale effort-déplacement maximal et deux modèles numériques sont présentés :

- Le premier en analyse linéaire matériau (servant à caler la raideur),
- Le deuxième non linéaire matériau incluant l'endommagement mais sans la modélisation des ruptures pour l'instant.

Cette première comparaison est encourageante. Le modèle capte aussi le flambement local de la peau entre les raidisseurs Oméga visible proche du rouleau central.

L'observation des éprouvettes après essais montre globalement deux types de rupture/endommagement :

- Rupture en traction de la peau inférieure,

- Décollement entre la peau supérieure et l'âme Oméga dû au flambement local de la peau supérieure.

Une comparaison calcul-essais d'impact a également été réalisée.

Les résultats finaux de cette modélisation ont permis d'obtenir des avancées significatives dans la modélisation du comportement des panneaux Oméga à fibre de Lin mais aussi dans la compréhension des modes de ruptures.

### 3.4.1. Optimisation du procédé de fabrication de panneaux

Dans un premier temps, afin de valider la faisabilité de la réalisation de panneaux oméga en lin, les panneaux sont réalisés en plusieurs étapes. Un modèle de moule et contre-moule pour la fabrication de l'âme en forme d'oméga a été conçu et fabriqué. Les peaux sont d'abord réalisées par thermo compression.

La fabrication de l'oméga s'est avérée plus délicate. Le tissu doit épouser le moule, sans être endommagé et ne pas glisser avant la mise sous pression. Ainsi plusieurs dispositifs de mise en place du tissu ont été testés. Différentes conditions de mise en œuvre de cet oméga ont été étudiées parmi lesquelles la pression. Ces travaux ont permis la réalisation d'une âme oméga de qualité satisfaisante.

Le collage des peaux s'est fait selon plusieurs protocoles, c'est-à-dire avec ou sans pré-polymérisation. In fine, un prototype de panneau oméga en lin a été réalisé (Photo 2).

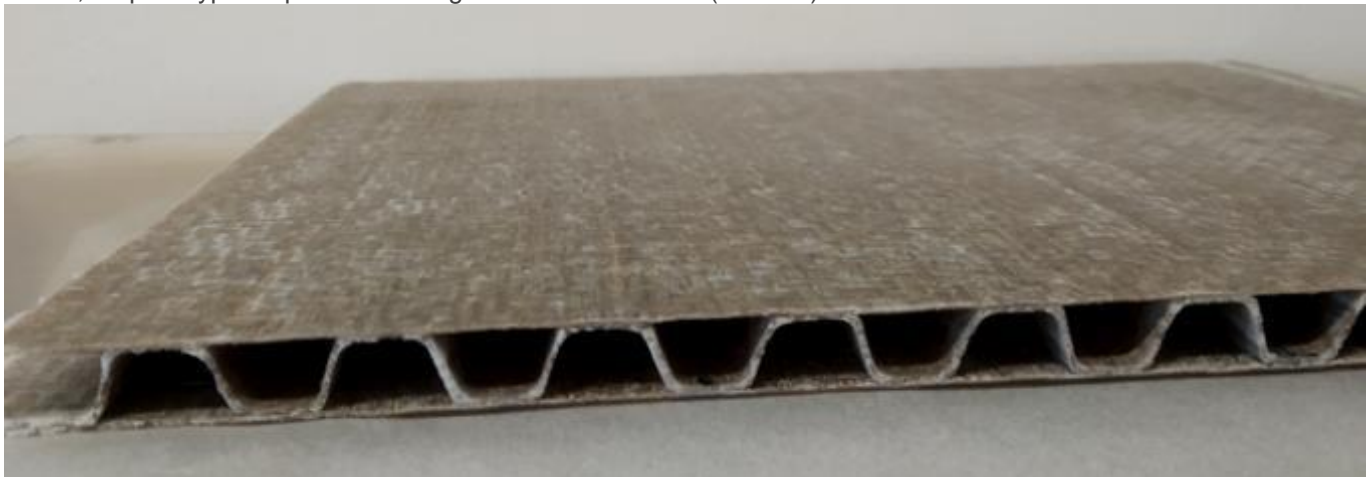


Photo 2. Panneau sandwich oméga plan en fibres de lin

Un démonstrateur de panneau oméga curviligne a également été fabriqué (Photo 1Photo 3).



Photo 3. Panneau oméga en lin curve

### 3.4.2. Tests mécaniques et tenue au feu des panneaux

Ces panneaux sandwich oméga ont ensuite été testés en flexion 3 points pour déterminer leurs propriétés mécaniques. A des fins de comparaison, des panneaux sandwich en fibres de verre et en fibres de lin avec une âme en nid d'abeille aramide ont également été testés.

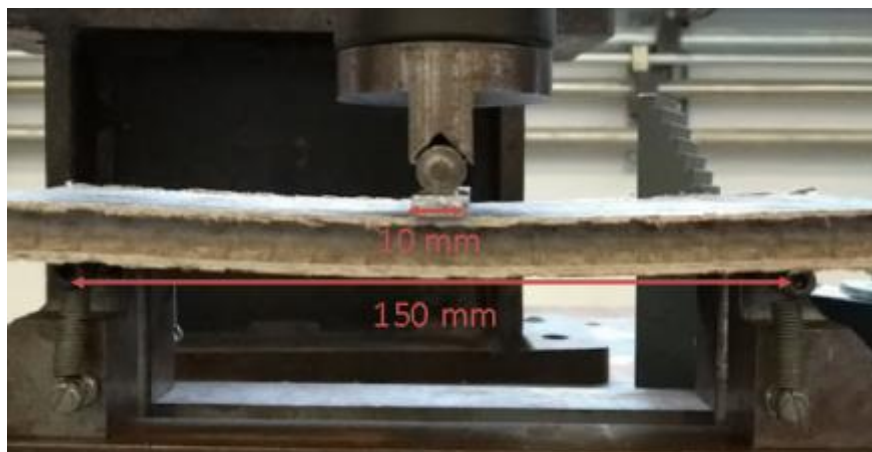


Photo 4. Configuration de l'essai de flexion 3D

Deux types principaux de comportements se dégagent en fonction de l'origine des fibres des panneaux. Les panneaux en fibres de verre présentent un comportement quasi linéaire jusqu'à la rupture. Dans le cas des panneaux en lin, y compris pour le panneau oméga, la phase élastique est plus courte et suivie d'une phase linéaire avec une raideur plus élevée. Les résultats obtenus indiquent que les propriétés mécaniques du panneau oméga en lin sont semblables à celles des panneaux commerciaux en fibres de verre tant pour la force à la rupture que pour la raideur.

Des tests d'inflammabilité ont également été réalisés. Le panneau oméga est autoextinguible, et la longueur de panneau brûlée respecte les standards de normes feu aéronautiques.

## 4. Analyse du cycle de vie (ACV)

Ces travaux ont été réalisés en suivant la norme ISO 14044 qui dicte les lignes conductrices à suivre pour la réalisation d'une ACV et identifie les 4 grandes étapes (Figure 3).

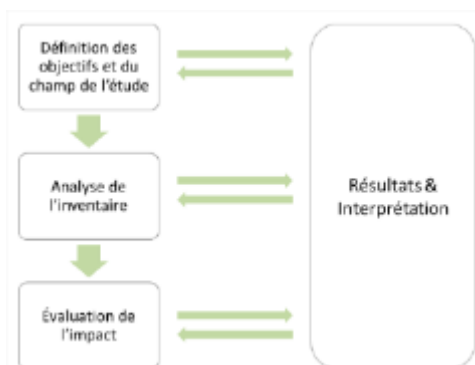


Figure 3. Etapes d'une ACV d'après la norme ISO 14044

Une vision générale de l'ensemble du cycle de vie du panneau oméga en lin est présentée en



Figure 4. De façon générale, une ACV permet de comparer la performance environnementale de produits et de les améliorer à partir de l'identification des étapes critiques. Pour ce cas d'étude, le produit d'intérêt est le panneau BOPA, fait d'un matériau composite « fibre de lin/résine époxy » avec une utilisation dans le secteur aéronautique. Il sera comparé avec un panneau conventionnel en fibre de verre.





Figure 4. Cycle de vie d'un composite en fibre de lin

#### 4.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'unité fonctionnelle est définie comme l'utilisation d'un m<sup>2</sup> de panneau comme aménagement intérieur dans un avion Airbus A320 NEO avec une durée de vie de 30 ans.

L'ACV a été réalisée avec SimaPro 8.5.2 et la méthode ILCD 2001 Midpoint+ a été choisie pour évaluer les impacts en changement climatique, appauvrissement de la couche d'ozone, formation de particules fines, rayonnement ionisant, formation d'oxydants photochimiques, acidification, eutrophisation d'eau douce, eutrophisation marine et épuisement des ressources minérales, fossiles et renouvelables.

La totalité de la chaîne d'approvisionnement du panneau BOPA est faite en France tandis que le panneau NORBOND est fait aux États-Unis. Le choix de fiches de procédés, notamment pour la production d'électricité, a été fait en conséquence.

L'ACV réalisée est qualifiée de « conséquentielle », c'est-à-dire qu'aucun co-produit n'est laissé en dehors des limites du système et son devenir est pris en compte pour évaluer la performance environnementale du produit. Cette approche suit les recommandations des normes ISO 14040 et 14044 (ISO 14040 2006; ISO 14044 2006) et permet de mieux comprendre les conséquences environnementales d'une décision prise.

#### 4.2. Analyse de l'inventaire

L'analyse de l'inventaire de chacune des étapes du cycle de vie du produit a été faite pour le panneau d'intérêt (BOPA) et le panneau conventionnel.

##### 4.2.1. Matières premières

Pour le panneau BOPA, trois composants ont été identifiés comme matières premières :

- Tissu technique en fibre de lin
- Résine époxy avec charge anti-feu
- Durcisseur

Les composants identifiés comme matières premières pour le panneau en fibres de verre et nid d'abeille aramide sont :

- Fibre d'aramide
- Résine phénolique
- Résine époxy
- Charge anti-feu
- Durcisseur
- Fibre de verre

#### 4.2.2. Production des panneaux

Le consommation énergétique liée à la production d'un panneau BOPA a été estimée à partir de mesures relevées et est ramenée à 1 m<sup>2</sup> de panneau oméga.

Pour le panneau conventionnel de référence en fibres de verre, la consommation énergétique pour la production de 1 m<sup>2</sup> de panneau a été tirée de la littérature<sup>10</sup>.

#### 4.2.3. Utilisation

Les deux panneaux sont considérés comme ayant les mêmes propriétés techniques et mécaniques. Les données utilisées pour modéliser l'étape d'utilisation sont donc les mêmes pour les deux panneaux (nature avion, consommation par km...).

Les informations suivantes ont été récupérées à partir du site web de SAS (Scandinavian Airlines) :

- Nombre de sièges : 174
- Max. takeoff weight : 77 t (masse de l'avion avec carburant et passagers)
- Range : 4600 km
- Consommation carburant : 0,025 litres / siège km
- Masse volumique du kérosène : 0,81 kg/l

Elles concernent les caractéristiques spécifiques d'un avion utilisé par une compagnie aérienne et ont été utilisées pour modéliser la consommation de kérosène par m<sup>2</sup> de panneau (l/m<sup>2</sup>).

#### 4.2.4. Fin de vie

Pour la fin de vie des panneaux, il a été décidé que les panneaux sont traités en fin de vie comme des déchets dangereux et sont incinérés.

Cette décision est une hypothèse très conservatrice à ce jour basée sur la législation des déchets dangereux (article R547-8 du code de l'environnement).

### 4.3. Evaluation de l'impact

La méthode ILCD 2001 Midpoint+ a été choisie pour l'évaluation de l'impact des panneaux. Des modifications ont été faites pour prendre en compte les dernières recommandations de la Commission Européenne (PEFCR; EC 2017).

La méthode d'analyse fait le lien entre les émissions issues des procédés que font parties de l'inventaire de cycle de vie (les résultats d'inventaire) et les impacts à l'environnement.

Parmi les 16 catégories d'impact proposées par ILCD 2001 Midpoint +, les suivantes ont été sélectionnées pour faire partie de l'évaluation (car elles sont explicitement recommandées par la Commission Européen (EC 2013) concernant les méthodes à utiliser pour les ACV): Changement Climatique, Déplétion de la couche d'ozone, Formation de particules, Formation d'oxydants photochimiques, Acidification, Eutrophisation des eaux douces, Eutrophisation marine et Déplétion des ressources minéraux, fossiles et renouvelables. En plus, afin d'inclure les impacts liés à l'utilisation d'énergie nucléaire, la catégorie d'impact Radiation ionisant a aussi été sélectionnée.

## 4.4. Résultats et interprétation

### 4.4.1. Approche du « berceau au tombeau » (« cradle to grave »)

Cette approche tient compte de l'utilisation et de la fin de vie du panneau.

Pour cette approche et pour les deux panneaux, la phase d'utilisation est ici la cause principale des impacts générés. Ces résultats sont directement liés aux émissions issues de la consommation du kérosène. Cela veut dire que la masse du panneau est l'élément critique. Il faut donc que le panneau soit le plus léger possible selon les hypothèses, les proxys et les données considérées.

### 4.4.2. Approche du « berceau à la porte » (« cradle to gate »)

Avec cette approche, les étapes du produit d'utilisation et de gestion en fin de vie ne seront pas prises en compte pour l'analyse.

Les gains pour le changement climatique dépendent largement de la durée de vie du panneau. La fin de vie de panneau devient donc critique car si le carbone stocké est relargué dans une période de temps trop courte, l'impact sur le changement climatique augmentera.

Une par une, les catégories d'impact ont été analysées et les contributeurs majoritaires identifiés. De plus, il a été repéré que l'étape de production a peu d'influence sur la performance environnementale du panneau ; l'approvisionnement de matières premières devient donc l'étape critique et pour laquelle il existe le plus d'opportunités d'amélioration.

Des analyses de sensibilité ont également été réalisées sur la base de scénarii. Il s'agissait de mesurer l'influence de certains changements (résine, charges, taux de résine...) dans la performance environnementale du panneau.

## 5. Conclusions / Perspectives

Le projet a ainsi permis :

- le développement d'une nouvelle méthode d'amélioration de l'adhésion de fibres naturelles respectueuse de l'environnement
- la démonstration de faisabilité d'un panneau oméga en lin
- la caractérisation des propriétés du panneau démontrant son potentiel pour de l'aménagement de cabines d'avions
- la modélisation de ce panneau en simulation numérique
- l'étude de l'impact environnemental de ce nouveau panneau avec différentes voies d'améliorations

Des travaux futurs sont nécessaires pour permettre :

- l'amélioration de la masse du panneau oméga
- la réalisation du panneau oméga en une étape
- l'amélioration des modèles numériques (modes de ruine, modèle décohésion peau/âme, modèle pour l'impact)
- La consolidation de certaines données d'entrées de l'ACV pour plus d'équité avec le produit de référence
- de faire de l'éco-conception (études de sensibilité en amont)

## Références bibliographiques

- (1) Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique.
- (2) Flightpath 2050: Europe's vision for aviation ; maintaining global leadership and serving society's needs ; report of the High-Level Group on Aviation Research; Europäische Kommission, Europäische Kommission, Eds.; Policy / European Commission; Publ. Off. of the Europ. Union: Luxembourg, 2011.
- (3) Kaufmann, M. Cost/weight optimization of aircraft structures, Farkost- och flyg, Kungliga Tekniska högskolan: Stockholm, 2008.
- (4) Natural Fiber Composites Market by Type , Manufacturing Process , Application , and Region - Global Forecasts to 2021 - market research report <http://www.reportlinker.com/p03793812/Natural-Fiber-Composites-Market-by-Type-Manufacturing-Process-Application-and-Region-Global-Forecasts-to.html> (accessed May 16, 2017).
- (5) Alomayri T, Assaedi H, Shaikh F U A and Low I M. Effect of water absorption on the mechanical properties of cotton fabric-reinforced geopolymer composites. *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol 2, pp 223–30, 2014.
- (6) Gay, D. *Composite Materials Design and Applications* (CRC Press), 2014.
- (7) Allix O., Corigliano A. Some aspects of interlaminar degradation in composites. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, vol. 185, pp. 203-224, 2000.
- (8) Lachaud F. Haramburu E., Jetteur P. Modélisation élastoplastique endommageable des composites. *Mécaniques et Industries*. vol 7, n° 4. 2006.
- (9) Lachaud F.. Contribution à l'analyse multi échelle du comportement mécanique non linéaire matériau des structures composites. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Toulouse. 2011.
- (10) Vidal, Rosario, Enrique Moliner, Pedro P. Martin, et al. Life Cycle Assessment of Novel Aircraft Interior Panels Made from Renewable or Recyclable Polymers with Natural Fiber Reinforcements and Non-Halogenated Flame Retardants: LCA of Novel Aircraft Interior Panels. *Journal of Industrial Ecology*, vol 22(1), pp 132–144, 2018.

## Index des tableaux et figures et photos

### Tableaux <sup>(i)</sup>

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

### Figures <sup>(i)</sup>

Figure 1. Les différentes approches des modélisations par éléments finis des panneaux Sandwichs à âme NIDA (cas des modèles de flexion 3pts).....	10
Figure 2 Exemple de comportement contrainte déformation en traction sens chaîne et en cisaillement plan pour un tissu satin de 5 G803/914 .....	11
Figure 3. Etapes d'une ACV d'après la norme ISO 14044.....	14
Figure 4. Cycle de vie d'un composite en fibre de lin.....	14

### Photos <sup>(i)</sup>

Photo 1. Observation de tissus à la loupe binoculaire .....	8
Photo 2. Panneau sandwich oméga plan en fibres de lin .....	12
Photo 3. Panneau oméga en lin curve .....	13
Photo 4. Configuration de l'essai de flexion 3D .....	13



## Sigles et acronymes

<b>ACARE</b>	Advisory Council for Aviation Research and innovation in Europe
<b>ADEME</b>	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
<b>ACV</b>	Analyse de cycle de Vie
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BOPA</b>	Biosourced Omega Panels for Aircrafts
<b>CIRIMAT</b>	Centre Interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux
<b>CNRS</b>	Centre National de la Recherche Scientifique
<b>COV</b>	Composés Organiques Volatils
<b>DETA</b>	Diethylenetriamine
<b>DGEBA</b>	Di-Glycidyl Ether of Bisphenol A
<b>DSC</b>	Calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry)
<b>ENSIACET</b>	Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques Et Technologiques
<b>FAR</b>	Federal Aviation Regulation
<b>GES</b>	Gaz à Effet de Serre
<b>GLARE</b>	Glass Laminated Reinforced Epoxy
<b>ICA</b>	Institut Clément Ader
<b>ILCD</b>	Integrated Life Cycle Design
<b>INPT</b>	Institut National Polytechnique de Toulouse
<b>ISAE</b>	Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace
<b>INRA</b>	Institut National de la Recherche Agronomique
<b>IUT</b>	Institut Universitaire Technologique
<b>LCA</b>	Laboratoire de Chimie Agro-industrielle
<b>PAN</b>	PolyAcryloNitrile
<b>POPE</b>	Programme d'Orientation de la Politique Energétique française
<b>REACH</b>	Registration, Evaluation, Authorization and restriction of Chemical substances
<b>UMR</b>	Unité Mixte de Recherche

## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

#  
#  
#



EXPERTISES

## PANNEAU SANDWICH OMEGA BIO-SOURCE POUR L'AERONAUTIQUE

L'objectif global de ce projet est de produire un panneau structurel sandwich innovant, qui, de par son architecture et sa composition, aura un poids 25% inférieur à ce qui existe. Le domaine d'application est l'aéronautique où ce panneau pourra ainsi servir en tant que plancher ou comme cloison murale et ainsi remplacer les panneaux de type GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy) ainsi que d'autres types de panneaux comme ceux en fibres de verre.



[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

